

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
и цифровому развитию ФГБОУ ВО
«СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,
доктор физ.-мат. наук, профессор
Алексей Александрович Короновский



« 20 » 10 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»

о научно-практической ценности диссертационной работы

Зыкова Алексея Андреевича на тему

«Развитие методов эластографической и ангиографической визуализации в оптической
когерентной томографии на основе реалистичного численного моделирования ОКТ-сканов»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Актуальность темы диссертации.

Диссертация Зыкова Алексея Андреевича посвящена актуальной задаче: разработке методов обработки спектральных данных оптических когерентных томографов (ОКТ) с целью улучшения качества визуализации и диагностической ценности так называемых «функциональных расширений» ОКТ – микроангиографии и эластографии на основе ОКТ. Эти направления, как отмечается в последние годы в фундаментальных обзорах по ОКТ-тематике, являются одними из наиболее перспективных для расширения диагностических возможностей ОКТ. В основе диссертации лежит задача создания «синтетических ОКТ данных», что является актуальной проблемой в контексте развития новых методов обработки

сигналов, поскольку позволяет проводить численные эксперименты в строго контролируемых условиях, где есть возможность гибко менять положение рассеивателей в имитируемом образце ткани и другие параметры как образца, так и самой ОКТ-установки. Проведение таких экспериментов в известных контролируемых условиях на реальных или фантомных образцах является или очень трудозатратным или даже невозможным, что подчёркивает актуальность подобного моделирования. Разработанные с применением предложенной модели новые алгоритмы компенсации маскирующих движений и анализа данных, позволяют существенно повысить качество ангиографической визуализации и точность реконструкции полей деформаций в эластографии. Это открывает новые возможности для диагностики состояния микроциркуляции, дифференцирования различных типов или состояний биотканей по различиям их упругих свойств, исследования механических свойств тканей, что свидетельствует о высокой актуальности проведенного исследования. Цели и задачи работы четко сформулированы и строго соответствуют полученным результатам.

Новизна исследования и полученных выводов, сформулированных в диссертации.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими ключевыми результатами:

В первой главе разработана и предложена новая модель для формирования ОКТ-сканов. За счёт выбранных упрощений, справедливых для широко применяемых на практике слабофокусированных оптических пучков, удалось добиться высокой вычислительной эффективности модели при сохранении адекватности описания ключевых физических особенностей формирования ОКТ-сигналов. Созданная модель предоставила уникальную возможность тестировать и совершенствовать новые методики эластографического и ангиографического анализа, где необходима генерация большого количества синтетических ОКТ данных.

Во второй главе описан новый алгоритм компенсации артефактов, вызванных маскирующими движениями живой биологической ткани, что является критически важной задачей для реализации ОКТ-ангиографии. Разработанный алгоритм за счёт использования теоремы Фурье о сдвиге, применяемой в скользящем окне, позволяет существенно снизить «декорреляционный шум» от маскирующих движений ткани. Также в этой главе предложен принципиально новый метод ангиографической визуализации, основанный на выделении сосудов как областей повышенной случайной "деформации" с использованием подходов фазочувствительной ОКТ-эластографии, в отличие от традиционных методов анализа временной изменчивости сигнала, используемых для реализации ОКТ-ангиографии.

В третьей главе, посвященной улучшению качества картирования деформаций в фазочувствительной ОКТ, для ОКТ-эластографии впервые выявлена взаимосвязь между масштабом усреднения фазочувствительных ОКТ-сканов и масштабом пространственного дифференцирования межкадровой разности фаз. А именно, установлено, что оптимальная область усреднения в 2 раза меньше оптимального шага дифференцирования. На основе этого факта впервые предложены методы адаптивного автоматического подбора указанных параметров обработки при реконструкции деформаций с высокой пространственно-временной изменчивостью, что позволяет существенно повысить качество эластографической визуализации без заметного снижения разрешения реконструируемого поля деформаций.

Значимость для науки и практики полученных результатов и их вклад для развития соответствующей отрасли науки

Практическая значимость данного исследования заключается в существенном вкладе в развитие ОКТ эластографии – фазочувствительной визуализации деформаций произвольного происхождения (механических, тепловых, осмотических). Разработанный в диссертации автоматический адаптивный выбор параметров анализа позволяет значительно повысить качество оценки и визуализации деформаций, что, в свою очередь, ведет к повышению точности характеристики упругих свойств биотканей и иных процессов, сопровождающихся развитием деформаций визуализируемой среды. Эти усовершенствования важны для уточнения знаний о свойствах биологических тканей и биоподобных материалов и для повышения надежности диагностических заключений на основе ОКТ-данных. Особую ценность адаптивные алгоритмы эластографической обработки представляют в ситуациях, когда деформации обладают значительной пространственной неоднородностью и изменчивостью во времени.

Дополнительно, предложенные методы компенсации движений ткани и новый подход к реализации ангиографии повышают качество ОКТ-ангиографии и в перспективе могут сократить время, необходимое для получения ангиограмм.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Разработанная в диссертации Зыкова А.А. новая модель формирования ОКТ-изображений может быть использована для валидации новых методик обработки сигнала, в том числе, выходящих за рамки рассмотренных функциональных расширений (ОКТ-ангиографии и эластографии), а также могут представлять высокий интерес в качестве «эталонных данных» (ground truth) при обучении нейронных сетей.

Результаты ОКЭ и ОКА исследований могут быть использованы в лабораторной и клинической практике для повышения качества и надёжности диагностических исследований.

Печатные работы, опубликованные по материалам диссертационного исследования. В списке публикаций по материалам диссертации приведены 7 журнальных статей в профильных рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК и индексируемых в Web of Science и Scopus, кроме того, результаты диссертации представлены в 9 докладах в трудах международных конференций, также индексируемых в Web of Science и Scopus.

Объём и содержание работы. Диссертационная работа Зыкова А.А. состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, трёх глав, заключения, списка цитированной литературы и списка опубликованных работ по теме диссертации. Общий объём диссертации - 114 страниц, включая 52 рисунка, 1 таблицу, список цитированной литературы, состоящий из 124 работ, и список работ по теме диссертации.

Во введении описана актуальность работы, указаны её цели, кратко излагается содержание диссертации, выделены положения, выносимые на защиту, приведена методология исследований.

Глава 1 посвящена рассмотрению основных методов формирования ОКТ-изображений и описанию предлагаемой автором вычислительно эффективной модели. В её основе лежит физически обоснованное представление среды в виде ансамбля дискретных рассеивателей, широко применяемое в современной литературе. Модель опирается на фундаментальное для ОКТ приближение однократного обратного рассеяния, надёжность которого для широкого класса биотканей многократно подтверждена экспериментально. Важным достоинством работы является корректный учет реальных особенностей большинства клинических ОКТ-установок, в которых используются слабофокусированные зондирующие пучки для обеспечения практически постоянного по глубине латерального разрешения. Это позволило аппроксимировать пучок моделью с плоским фазовым фронтом и постоянным диаметром, но сохраняя учет влияния амплитудного поперечного профиля пучка, что адекватно описывает процесс визуализации в случае наиболее распространенных ОКТ-систем со слабофокусированным пучком. При этом использованные упрощения одновременно обеспечивают высокую вычислительную эффективность получения модельных сканов. На основе предложенной модели был проведен численный эксперимент, позволивший в контролируемых условиях детально исследовать декорреляцию ОКТ-спектров внутри модельного кровеносного сосуда. Моделирование эритроцитов в виде «гантелей» и анализ эволюции коэффициента корреляции $C(t)$ во времени позволили впервые изучить индивидуальные вклады различных механизмов движения: регулярного сдвига, а также

поступательного и вращательного броуновских движений частиц крови. В предельных случаях было показано согласование получаемых результатов с ранее известными закономерностями и обнаружены новые временные особенности декорреляции, которые ранее не были обнаружены в приближении однократного рассеяния. Возможность проведения такого численного эксперимента наглядно подчёркивает важность моделирования, поскольку на практике изучение изолированных типов движений рассеивателей не является возможным, однако легко реализуется в модели.

В Главе 2 исследуется одна из ключевых проблем оптической когерентной ангиографии (ОКА) – компенсация маскирующих движений окружающей сосуда ткани. Автором предложен принципиально новый метод, основанный на применении теоремы о фурье-сдвиге в пределах скользящего окна. Его ключевое преимущество заключается в способности эффективно компенсировать не только фазовые, но и амплитудные искажения, возникающие при сверхволновых и пространственно-неоднородных смещениях рассеивателей, что характерно для контактного режима диагностики. Проведенные сравнительные исследования продемонстрировали, что разработанный алгоритм обеспечивает существенное подавление декорреляционного шума и значительное повышение контраста сосудов по сравнению с использованием только фазовой компенсации. Также во второй главе предложен принципиально новый подход к ангиографической визуализации, основанный на аналогии с методами ОКТ-эластографии. В отличие от традиционных методов, анализирующих временную изменчивость сигнала, данный подход идентифицирует сосуды как области локально повышенной случайной "деформации" на фоне плавных смещений окружающей ткани. Важными преимуществами метода являются эффективная компенсация артефактов от маскирующих движений и вычислительная эффективность, обеспечивающая перспективу реализации визуализации в реальном времени для клинических применений.

В Главе 3 представлен комплексный подход к адаптивной обработке данных для векторного метода оценки деформаций в фазочувствительной оптической когерентной эластографии. На практике распределение межкадровых деформаций является сильно неоднородным, но для обработки сканов применяют малые фиксированные значения параметров. Таким образом, параметры, которые являются оптимальными в одной области, оказываются далеки от оптимальных в других областях скана. Разработанный автором метод решает задачу адаптивного выбора параметров обработки - шага дифференцирования для расчёта фазового градиента и размера области усреднения реальных зашумленных ОКТ сигналов, автоматически учитывая пространственную неоднородность деформаций.

Практическая ценность работы заключается в высоком подавлении шумов различной природы, которое достигает ~15 дБ.

В заключении автор сформулировал основные результаты, полученные в диссертации. Результаты работы полностью соответствуют поставленным целям и задачам.

Обоснованность и достоверность сформулированных научных положений, выводов и рекомендаций.

В основе диссертации лежит общепризнанная теория формирования фазочувствительных ОКТ-сигналов, на основе которой предложена сформулированная в диссертации вычислительно эффективная модель. Корректность выбранного в диссертации упрощения для данной модели подтверждается сравнением с более полными моделями в предельных случаях.

Достоверность разработанных методов обработки сигнала подтверждается детальным сравнением с другими методами обработки сигнала (например, разработанный ангиографический метод сравнивается с методом фурье-фильтрации), совпадением полученных зависимостей в предельных случаях с известными в литературе, а также совпадением результатов аналитического исследования и численного эксперимента. Диссертация опирается на опубликованные статьи автора в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах индексируемых в WoS и Scopus. Личный вклад Зыкова А.А. в выполнение диссертационной работы не вызывает сомнений.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации и автореферата.

Диссертационная работа Зыкова А.А. имеет классическую структуру. В каждой из глав автор подробно обсуждает базовые физические принципы развиваемых методов обработки сигнала, описывает существующие проблемы и предлагает методы их решения. Это позволяет сформировать достаточно полное представление о проделанной работе и месте полученных результатов в контексте исследований в данной области науки.

Основные положения/результаты работы были представлены и прошли апробацию на ряде ведущих профильных конференций - на проводимых ННГУ конференциях по радиофизике (2019, 2020), Всероссийском молодежном Самарском конкурсе – конференции научных работ по оптике и лазерной физике (2020, 2022, 2023), конференции Экспериментальная и компьютерная биомедицина (Екатеринбург, 2021), XXV Saratov Fall Meeting (2021), Нижегородской сессии молодых ученых (2022), международной конференции International Conference Laser Optics ICLO-2022 (St. Petersburg, 2022), конференции Current Trends in Biophotonics (Nizhny Novgorod, 2023), международной конференции SPIE/COS

PhotonicsAsia (Beijing, 2023), международной конференции Advanced Laser Technologies (ALT-2024, Vladivostok, 2024). Все основные результаты диссертации опубликованы в ряде публикаций, включая 7 статей в профильных рецензируемых журналах высокого уровня, индексируемых в WoS и Scopus. Имеется также 9 публикаций в трудах ведущих конференций, также индексируемых в WoS и Scopus. Проведённые исследования использовались при выполнении ряда проектов фондов РФФИ и РНФ.

Автореферат полно представляет содержание основных разделов диссертации и полученные собственные результаты. В реферате корректно отражены актуальность, цели и задачи, научная новизна, научно-практическая значимость, положения, выносимые на защиту, объекты и методы исследования, основные результаты работы и список публикаций по теме диссертации.

Принципиальных замечаний, снижающих ценность представленного исследования, нет. Вместе с этим, в ходе ознакомления с содержанием работы возникли следующие вопросы и замечания дискуссионного и уточняющего характера:

- В работе при проведении сравнения с альтернативными подходами к ОКТ-ангиографии проводится сравнение с методом высокочастотной фильтрации, также разработанным в ИПФ РАН. Вместе с тем, в мире широко применяется другой предложенный в Университете Торонто метод ОКА на основе “speckle variance”, который в диссертации непосредственно не обсуждается. Как диссертант может прокомментировать соотношение с этим подходом?
- Диссертант в своей работе (например, с. 25 диссертации) подчеркивает вычислительную эффективность предложенного подхода к моделированию ОКТ сканов без явного обсуждения сопоставления с результатами других работ по моделированию ОКТ сканов. Что можно сказать про такое сопоставление?
- В диссертации четко не обозначены границы применимости принятого в главе 1 приближения однократного рассеяния. В каких тканях/глубинах/условиях многократное рассеяние и/или флуктуации показателя преломления начинают вносить существенную ошибку в прогнозы? Как это отражается на точности и устойчивости предложенного ОКА-метода, и какие меры компенсации автор рекомендует?
- В предложенном методе компенсации на основе фурье-сдвига используется скользящее окно. Как размер этого окна влияет на компромисс между точностью компенсации больших смещений и сохранением мелких деталей ангиограммы, особенно тонких капилляров?
- В главе 2.4 заявлена работа алгоритма снижения межкадровой декорреляции в реальном времени. Полезно привести фактические метрики производительности для ОКА-S и метода

амплитудно-фазовой компенсации: средний FPS и/или время кадра при типичном размере визуализируемого объема биоткани (указать параметры сетки/разрешение), а также используемую аппаратную конфигурацию (модель CPU/GPU, объем ОЗУ).

- В диссертации термин «эластография» используется в широком смысле с подчеркиванием важности получаемых для визуализации деформаций самого различного происхождения. В литературе наиболее широко обсуждается картирование деформаций для реализации компрессионной эластографии и визуализации механически-вызванных деформаций в биотканях, для которой развитые адаптивные методы явно могут быть важны. Может ли автор привести иные конкретные примеры важности использования развитых адаптивных методов эластографического анализа?

- В тексте диссертации и иллюстрациях имеется ряд неаккуратно выбранных обозначений, затрудняющих понимание. Например, на рис. 1.8 приводятся примеры реконструкции межкадровых вариаций фазы, полученных при различных параметрах усреднения, однако в подписях под этими различными примерами использовано одно и то же обозначение «Ф». Аналогичное замечание относится и к одинаковому обозначению полей деформаций, получаемых при различных условиях.

Заключение

Диссертационная работа Зыкова Алексея Андреевича «Развитие методов эластографической и ангиографической визуализации в оптической когерентной томографии на основе реалистичного численного моделирования ОКТ-сканов», является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новое решение актуальной научной задачи по моделированию реалистичных «цифровых фантомов» биоткани и улучшению эластографических и ангиографических методов ОКТ-визуализации. Характер решаемых в диссертации задач и применяемые методы решения в полной мере соответствуют паспорту специальности 1.3.4 – Радиофизика. Разработанные методы обработки сигнала, несомненно, важны для широкого круга применений, в том числе для решения биомедицинских задач, имеющих важное социальное значение. Таким образом, работа полностью отвечает требованиям п.п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв о научно-практической значимости диссертационной работы Зыкова Алексея Андреевича на тему «Развитие методов эластографической и ангиографической визуализации в оптической когерентной томографии на основе реалистичного численного моделирования

ОКТ-сканов», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.4. – Радиофизика, заслушан, обсуждён и одобрен на расширенном заседании кафедры оптики и биофотоники ФГБОУ ВО СГУ им. Н.Г. Чернышевского, протокол № 12/25 от 07 октября 2025 года.

Отзыв составили:

Профессор кафедры оптики и биофотоники
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
доктор физико-математических наук
(специальность 03.01.02 - Биофизика), доцент
e-mail: geninaea@sgu.ru
телефон: +7 (917) 312-59-81

Генина Элина Алексеевна

Заведующий кафедры оптики и биофотоники
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН
(специальность 01.04.03 - Радиофизика)
e-mail: tuchinvv@mail.ru
телефон: +7 (904) 241-97-10

Тучин Валерий Викторович

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Министерства науки и высшего образования (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» Минобрнауки России); 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83
+7 (8452) 26-16-96, rector@sgu.ru, www.sgu.ru

10 октября 2025 г.

Подпись Генной Е.А. удостоверяю
Ученый секретарь
Ученого совета СГУ
«10» октября 2025 г.



Подпись Тучина В.В. удостоверяю
Ученый секретарь
Ученого совета СГУ
«10» октября 2025 г.

